

DOI :10.3880/j. issn. 1006-7647. 2009. 04. 002

离散卡尔曼滤波法在滑坡变形预测中的应用

陆付民 王尚庆 李 劲

(三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室 湖北 宜昌 443002)

摘要 :讨论了树坪滑坡的基本特征及其形成机制 ,介绍该滑坡的监测系统。变形监测表明树坪滑坡的变形主要与滑坡体的地形地貌及土层结构有关 ,而大气降雨及三峡水库库水位的影响是导致树坪滑坡产生变形的外界因素。使用泰勒级数建立滑坡变形与时间的函数关系 ,并将泰勒级数的余项及时间变化的 2 次方及 3 次方的系数变化量看作数学期望为零的动态噪声 ,建立卡尔曼滤波模型 ,应用于滑坡变形的预测预报。算例计算结果表明卡尔曼滤波模型的拟合效果和预测效果良好。
关键词 滑坡变形 ;变形监测 ;动态噪声 ;卡尔曼滤波 ;变形预测 ;树坪滑坡

中图分类号 :TB115 ;TV698.2⁺32 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2009)04-0006-04

Application of discrete Kalman filter method in landslide deformation forecast / LU Fu-min , WANG Shang-qing , LI Jin(Key Laboratory of Geological Hazards for Three Gorges Reservoir Area , Ministry of Education , China Three Gorges University , Yichang 443002 , China)

Abstract : The fundamental features and the formation mechanism of the Shuping landslide are discussed. The monitoring system of the Shuping landslide is introduced. The deformation monitoring shows that the deformation of the Shuping landslide is related to the topography and geomorphology and the soil layer construction of the landslide. The atmospheric rainfall and the water level of the Three Gorges reservoir are the external factors causing the deformation of the Shuping landslide. The Taylor series is used to establish the functional relationship between the deformation of the landslide and the time. The remainder term of the Taylor series and the variation of coefficients of the square or cube of the time are regarded as dynamic noises whose expected value is 0. The Kalman filter model is described and used to predict the deformation of the landslide. A numerical example shows that the fitted effect and the forecast effect of the model are good.

Key words : landslide deformation ; deformation monitoring ; dynamic noise ; Kalman filter ; deformation forecast ; shuping landslide

滑坡变形预测方法的研究引起了学者们的广泛关注 ,如文献 [1-3] 将灰色模型中的 GM(1,1)模型及改进的 GM(1,1)模型应用于滑坡及危岩体的变形预测 ,文献 [3]和文献 [4]分别将 ARMA(n,m)模型及 AR(n)模型应用于危岩体和滑坡的变形预测 ,文献 [5]通过变量代换 ,将指数趋势模型应用于危岩体的变形预测。将 GM(1,1)模型、ARMA(n,m)模型及 AR(n)模型应用于滑坡或危岩体的变形预测 ,一般要求监测数据具有等时间间隔 ,而在实际滑坡监测过程中 ,由于天气或其他方面的原因 ,往往无法取得等时间间隔的监测数据 ,在这种情况下就无法将 GM(1,1)模型、ARMA(n,m)模型及 AR(n)模型用于滑坡的变形预测。如果滑坡变形从加速变形逐渐趋于稳定 ,则指数趋势模型可以很好地用于滑坡或

危岩体的变形预测 ,若滑坡变形没有逐渐趋于稳定 ,则指数趋势模型用于滑坡的变形预测效果较差。另外 ,由于指数趋势模型将模型的参数看作定值 ,从而限制了模型适应观测数据的能力 ,导致模型的拟合效果和预测效果较差。为此 ,笔者将滑坡的变形看作时间的函数 ,利用泰勒级数建立卡尔曼滤波模型的状态方程 ,由于在卡尔曼滤波过程中模型的参数不断变化 ,从而增强了卡尔曼滤波模型适应观测数据的能力 ,在某种程度上提高了模型的拟合精度和预测精度 ,实例计算结果也证明了这一点。

1 树坪滑坡的基本特征

树坪滑坡位于长江南岸 ,下距长江三峡大坝 47 km ,地属湖北省秭归县沙镇溪镇树坪村一组。树

基金项目 精密工程与工业测量国家测绘局重点实验室开放基金(PF2009-8) ;湖北省自然科学基金(2008CDB047) ;国家科学技术部三峡库区滑坡监测数据资源平台建设项目(2005DKA10600) ;湖北省“十五”科技攻关计划(2004AA306B02)

坪滑坡概貌如图 1 所示。树坪滑坡属古崩滑堆积体, 滑坡形态为明显的圈椅状, 由 1 号和 2 号滑坡体组成, 如图 2 所示。滑坡体东侧以屈家坪至姜家湾地带的叶儿开沟为界, 西侧以南北向冲沟龙井沟为界, 后缘以姜家湾至上树坪沙黄公路为界(高程约 430 m), 前缘直抵长江。滑体南北纵长约 800 m, 东西宽约 700 m, 滑体厚 40 ~ 70 m, 总体积约为 $2.89 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。



图 1 树坪滑坡概貌

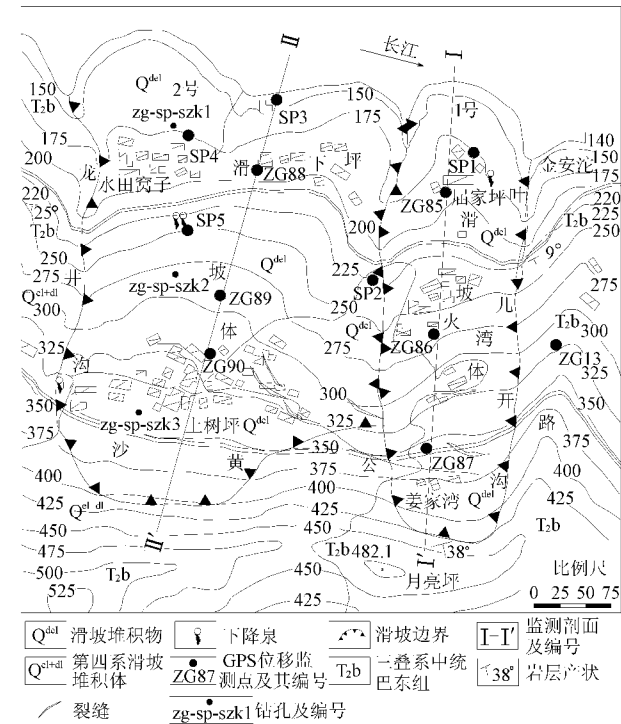


图 2 树坪滑坡监测点布置示意图

滑坡体总体形态呈下陡上缓、南高北低, 坡度为 $20^\circ \sim 35^\circ$, 自上而下分布有 2 级缓坡平台, 高程分别为 150 ~ 200 m 和 300 ~ 350 m。

滑坡体物质主要为碎石土夹块石及河流阶地沉积物, 块石成分主要为砂质泥岩、泥质粉砂岩及褐灰色泥灰岩, 块径一般为 0.2 ~ 0.5 m, 碎石土土石比为 5:5 ~ 7:3, 碎石粒径一般为 2 ~ 8 cm。滑带为堆积层与基岩接触带, 以碎石土为主。滑床主要为三叠系中统巴东组 $T_2b^2 \sim T_2b^4$ 地层, 由棕红色砂质泥岩、泥质粉砂岩以及褐灰色泥灰岩组成。滑坡区地下水的主要类型有 2 类: 一类是松散堆积物中的孔隙水, 含

水介质为第四系崩坡积松散堆积物, 具有中等透水性; 另一类是基岩裂隙水, 含水介质主要为泥质粉砂岩和褐灰色泥灰岩, 具有弱透水性。地下水的补给主要来源于大气降雨和三峡水库的蓄水。

2 树坪滑坡的形成机制

由于树坪滑坡地形坡度较陡, 且向长江倾斜, 前缘坡脚受长江水的不断冲蚀和浸泡形成临空面, 使滑坡体有了变形的空间。滑坡体物质为结构松散的碎石土夹块石和河流阶地堆积物, 在外力作用下易于变形, 为滑坡变形提供了物质条件。大气降雨使滑坡体地下水位抬高, 导致水力坡度增大, 滑体动、静水压力增大, 同时地下水饱和软化滑带土, 使滑体易于变形失稳。三峡水库 2003 年 6 ~ 10 月蓄水至 139 m, 使长江水位上涨约 70 m。水库水位抬升使得滑坡体的地下水位升高, 同时使滑坡体外缘土层松软, 导致水下岸坡稳定性降低。

3 树坪滑坡的监测系统

根据树坪滑坡的地形和地质条件以及变形特征, 确定该滑坡的监测内容主要为地表位移变形监测、地下水位监测、地表裂缝监测、宏观地质巡查监测等。监测工作自 2003 年 6 月上中旬三峡大坝坝前水位蓄水至 135 m 开始陆续展开, 地表位移变形监测 1 次/月, 地下水位监测 1 次/d, 地表裂缝监测及宏观地质巡查监测 1 ~ 3 次/月。

3.1 地表位移变形监测

在滑坡区布设有 11 个 GPS 变形监测点, 如图 2 所示, 其中监测点 ZG85、ZG86、ZG87 构成 I - I' 监测剖面, 监测点 SP3、ZG88、ZG89、ZG90 构成 II - II' 监测剖面 (SP1 ~ SP5 为后来补充的 GPS 变形监测点), 采用美国生产的天宝 GPS 接收机进行滑坡地表位移变形监测, 同时在滑坡体外围东侧稳定的基岩上布设 1 个 GPS 基准点 (ZG13), 作为地表位移变形监测的基准。

3.2 地下水位监测

在滑坡体的西部布设有 3 个地下水位监测孔, 编号分别为 zg-sp-szk1、zg-sp-szk2、zg-sp-szk3, 采用国产 Ws-1040 型地下水位自动监测仪监测地下水位的

3.3 地表裂缝监测

在滑坡区地表裂缝及房屋裂缝处布设 11 个跨缝式津易裂缝监测点, 采用钢卷尺等测量工具定期监测裂缝两侧的相对张开、闭合、下沉及位错。

3.4 宏观地质巡查监测

采用常规地质调查方法对地面裂缝、建筑物的

开裂、下沉、鼓起与短期临滑前兆(如地声、地下水异常、动物异常)等宏观变形迹象进行巡视监测。

4 树坪滑坡变形特征

采用 2003 年 6 月上旬至 2006 年 12 月树坪滑坡地表位移变形监测、地下水位监测、地表裂缝监测及宏观地质巡查监测的相关资料,对树坪滑坡变形特征进行如下分析。

4.1 地表变形特征

a. 位于东部 1 号滑坡中下部的 4 个 GPS 变形监测点 ZG85、ZG86、SP1、SP2 的累计位移量为 596.1~702.2 mm,平均月位移量为 14.3~30.1 mm,位移方向指向长江偏下游;位于 1 号滑坡地表上部的 GPS 变形监测点 ZG87 累计位移量为 397.1 mm,平均月位移量为 9.7 mm,位移方向指向北。

b. 位于西部 2 号滑坡下部的 2 个 GPS 变形监测点 ZG88、SP3 累计位移量为 570.3~650.6 mm,平均月位移量为 13.9~15.7 mm,位移方向指向长江;位于 2 号滑坡地表中部的 2 个 GPS 变形监测点 ZG89、ZG90 累计位移量为 73.9~137.6 mm,平均月位移量为 1.8~3.4 mm,位移方向指向北东。

c. 监测数据表明 1 号滑坡比 2 号滑坡的变形量大,2 个滑坡下部比中上部的变形量大,表现出明显的牵引式滑坡变形特征。

4.2 宏观地质巡查监测结果

三峡水库蓄水到 135~156 m 期间,树坪滑坡的稳定性变差。2003 年 10 月至 2004 年 1 月滑坡变形以前缘舌部塌岸为主,受江水冲刷的影响出现浑浊区。2004 年 1 月以后滑坡变形以地面裂缝和房屋开裂为主。2004 年 1 月 25 日及 2 月 7 日滑坡区大部分村民在夜间能听到房屋及地下发生的异常响声。1 号滑坡上部沙黄公路地带(高程约 355 m),出现断断续续向西延伸的裂缝,裂缝长一般 10 m 左右,宽 1~5 cm。部分村民房屋的墙体出现不同程度的开裂,墙体开裂缝宽一般为 0.1~2 cm。滑坡体东侧边界下段发育有 1 条近南北向剪切裂缝,长约 100 m。

5 卡尔曼滤波模型

离散线性系统的卡尔曼滤波模型状态方程和观测方程分别为^[6-10]:

$$X_{k+1} = \Phi_{k+1,k}X_k + \Omega_k \tag{1}$$

$$L_{k+1} = B_{k+1}X_{k+1} + \Delta_{k+1} \tag{2}$$

式中: X_k 和 L_k 分别为 t_k 时刻的状态向量和观测向量; $\Phi_{k+1,k}$ 为 t_k 时刻至 t_{k+1} 时刻的状态转移矩阵; B_{k+1} 为 t_{k+1} 时刻的观测矩阵; Ω_k 和 Δ_k 分别为 t_k 时刻的动态噪声和观测噪声。

所谓离散线性系统的状态估计,就是利用观测

向量 $L_1, L_2, \dots, L_k$ 根据其数学模型求定 t_j 时刻状态向量 X_j 的最佳估值。通常把所得到的估计量记为 $X(j/k)$,它可分为 3 种情况^[2]:①当 $j = k$ 时,称 $X(k/k)$ 为最佳滤波值,并把 $X(k/k)$ 的求定过程称为卡尔曼滤波。②当 $j > k$ 时,称 $X(j/k)$ 为最佳预测值,并把 $X(j/k)$ 的求定过程称为预测或外推。③当 $j < k$ 时,称 $X(j/k)$ 为最佳平滑值,并把 $X(j/k)$ 的求定过程称为平滑或内插。

卡尔曼滤波模型的随机模型为^[7,10]

$$\begin{cases} E(\Omega_k) = 0 \\ E(\Delta_k) = 0 \\ \text{cov}(\Omega_k, \Omega_j) = D_{\Omega}(k)\delta_{kj} \\ \text{cov}(\Delta_k, \Delta_j) = D_{\Delta}(k)\delta_{kj} \\ \text{cov}(\Omega_k, \Delta_j) = 0 \\ E(X_0) = \mu_X(0) = X(0/0) \\ \text{var}(X_0) = D_X(0) \\ \text{cov}(X_0, \Omega_k) = 0 \\ \text{cov}(X_0, \Delta_k) = 0 \end{cases} \tag{3}$$

式中: $E(\Omega_k)$ 为 Ω_k 的数学期望; $E(\Delta_k)$ 为 Δ_k 的数学期望; $\text{cov}(\Omega_k, \Omega_j)$ 为 Ω_k 与 Ω_j 的协方差; $D_{\Omega}(k)$ 为 Ω_k 的方差; $\text{cov}(\Delta_k, \Delta_j)$ 为 Δ_k 与 Δ_j 的协方差; $D_{\Delta}(k)$ 为 Δ_k 的方差; $\text{cov}(\Omega_k, \Delta_j)$ 为 Ω_k 与 Δ_j 的协方差; $E(X_0)$ 为 X_0 的数学期望; $\text{var}(X_0)$ 为 X_0 的方差; $\text{cov}(X_0, \Omega_k)$ 为 X_0 与 Ω_k 的协方差; $\text{cov}(X_0, \Delta_k)$ 为 X_0 与 Δ_k 的协方差。当 $j = k$ 时 $\delta_{kj} = 1$,当 $j \neq k$ 时 $\delta_{kj} = 0$ 。

由状态方程、观测方程和随机模型,即可推出如下卡尔曼滤波方程^[7,10]:

$$\begin{cases} X(k/k) = X(k/k-1) + J_k[L_k - B_kX(k/k-1)] \\ D_X(k/k) = [I - J_kB_k]D_X(k/k-1) \end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases} X(k/k-1) = \Phi_{k,k-1}X(k-1/k-1) \\ D_X(k/k-1) = \Phi_{k,k-1}D_X(k-1/k-1) \cdot \\ \quad \Phi_{k,k-1}^T + D_{\Omega}(k-1) \\ J_k = D_X(k/k-1)B_k^T[B_kD_X(k/k-1) \cdot \\ \quad B_k^T + D_{\Delta}(k)]^{-1} \end{cases} \tag{5}$$

式中 I 为单位矩阵。

6 状态方程和观测方程的建立

将滑坡的变形看作时间的函数,由于滑坡变形观测的时间间隔较短(一般为 1 个月观测 1 次),且变形量的变化较小,现将滑坡 t_{k+1} 时刻的变形量 $x(t_{k+1})$ 在 t_k 时刻用泰勒级数展开,得

$$x(t_{k+1}) = x(t_k) + \left(\frac{\partial x}{\partial t}\right)_{t_k}(t_{k+1} - t_k) +$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \right)_{t_k} (t_{k+1} - t_k)^2 + \frac{1}{6} \left(\frac{\partial^3 x}{\partial t^3} \right)_{t_k} (t_{k+1} - t_k)^3 + g_k \quad (6)$$

$$\text{令 } v_k = \left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)_{t_k} \quad a_k = \left(\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \right)_{t_k} \\ s_k = \frac{1}{6} \left(\frac{\partial^3 x}{\partial t^3} \right)_{t_k} \quad x_k = x(t_k)$$

则式(6)可以写成

$$x_{k+1} = x_k + v_k(t_{k+1} - t_k) + \frac{1}{2} a_k(t_{k+1} - t_k)^2 + s_k(t_{k+1} - t_k)^3 + g_k \quad (7)$$

式中: v_k 为 t_k 时刻的滑坡变形速度; a_k 为 t_k 时刻的滑坡变形加速度; s_k 为时间变化的3次方对滑坡变形的影响; g_k 为泰勒级数的余项, 其值微小, 可以看作数学期望为零的动态噪声。

$$\text{令 } v_{k+1} = v_k + a_k(t_{k+1} - t_k) + c_k \quad (8)$$

$$a_{k+1} = a_k + r_k \quad (9)$$

$$s_{k+1} = s_k + p_k \quad (10)$$

式中 c_k, r_k, p_k 为微小的扰动, 也可以分别看作数学期望为零的动态噪声。

将式(7)~(10)写成矩阵形式, 得

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ v_{k+1} \\ a_{k+1} \\ s_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_{k+1} - t_k & \frac{1}{2}(t_{k+1} - t_k)^2 & (t_{k+1} - t_k)^3 \\ 0 & 1 & t_{k+1} - t_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ v_k \\ a_k \\ s_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_k \\ c_k \\ r_k \\ p_k \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\text{令 } X_k = \begin{bmatrix} x_k \\ v_k \\ a_k \\ s_k \end{bmatrix} \quad \Omega_k = \begin{bmatrix} g_k \\ c_k \\ r_k \\ p_k \end{bmatrix}$$

$$\Phi_{k+1, k} = \begin{bmatrix} 1 & t_{k+1} - t_k & \frac{1}{2}(t_{k+1} - t_k)^2 & (t_{k+1} - t_k)^3 \\ 0 & 1 & t_{k+1} - t_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

则式(11)可以转化为

$$X_{k+1} = \Phi_{k+1, k} X_k + \Omega_k \quad (12)$$

式(12)即为卡尔曼滤波法的状态方程。

对于变形观测, 有

$$l_{k+1} = x_{k+1} + \Delta'_{k+1} \quad (13)$$

式中: l_{k+1} 为观测向量分量; x_{k+1} 为状态向量分量; Δ'_{k+1} 为观测噪声分量。

令 $L_{k+1} = [l_{k+1}]$, $B_{k+1} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$, 则式(13)可以写成下列形式:

$$L_{k+1} = B_{k+1} X_{k+1} + \Delta_{k+1} \quad (14)$$

式(14)即为卡尔曼滤波法的观测方程。

由状态方程式(12)及观测方程式(14), 并考虑随机模型式(3), 由卡尔曼滤波方程式(4)即可进行卡尔曼滤波。

7 算 例

基于上述建模思路, 选取树坪滑坡地表位移变形监测点 ZG88(该点位于滑坡的中下部, 变形相对较大)2006 年的水平位移变形监测资料进行计算。根据变形监测资料分析, 水平位移变形监测的方差取 $\pm 1 \text{ mm}$, 计算时取

$$X(0/0) = \begin{bmatrix} 448.5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

其中 448.5 为 ZG88 点 2005 年 12 月的水平位移变形监测值。本次计算取

$$D_X(0/0) = D_X(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ D_{\Omega}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

有关计算结果见表 1。

表 1 ZG88 点水平位移变形监测值与相应的滤波值

观测时间	监测值/ mm	滤波值 (拟合值)/mm	残差/ mm
2006-01-12	468.6	468.3	-0.3
2006-02-20	471.5	471.3	-0.2
2006-03-18	487.1	486.0	-1.1
2006-04-18	498.9	499.3	0.4
2006-05-18	525.3	524.6	-0.7
2006-06-16	551.3	551.1	-0.2
2006-07-16	577.1	577.8	0.7
2006-08-17	594.3	595.6	1.3
2006-09-19	623.0	622.3	-0.7
2006-10-17	624.3	625.2	0.9
2006-11-11	639.0	638.1	-0.9

注: 滤波值为使用卡尔曼滤波法求出的 ZG88 点相应观测时刻的拟合值, 残差为滤波值与监测值之差。

由表 1 可以看出, 使用卡尔曼滤波法求出的残差较小, 最大为 1.3 mm, 最小只有 (下转第 35 页)

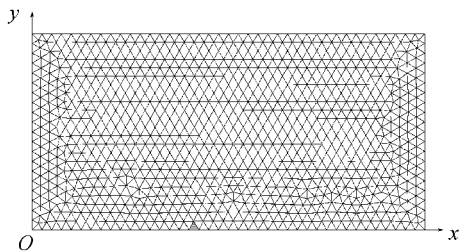


图3 矩形水槽三角形网格剖分

6 结 语

笔者讨论了采用有限体积法处理底坡项的常见算法,推导出三角形网格斜底模型守恒物理量线性重构时计算静水压力项和底坡项的积分平衡法。积分平衡法能够准确计算控制体界面处的静水压力项和控制体上底坡项的值,并且在静水条件下两者可以保持严格的平衡。过丘恒定流算例计算结果表明,该算法能够消除虚假流动,使水流保持静水状态。

参考文献:

[1] 谭维炎,胡四一.计算浅水动力学的新方向[J].水科学进展,1992,13(4):310-317.
 [2] 胡四一,谭维炎.一维非恒定明流计算的三种高性能差分格式[J].水科学进展,1991,11(1):11-21.
 [3] 谭维炎.浅水动力学的回顾和当代前沿问题[J].水科学进展,1999,19(3):296-303.

[4] 谭维炎,胡四一.浅水流动计算中一阶有限体积法 Osher 格式的实现[J].水科学进展,1994,14(4):262-270.
 [5] LEVEQUE R J. Balancing source terms and flux gradients in high-resolution godunov methods: the quasi-steady wave-propagation algorithm[J]. J Comput Phys, 1998, 146: 346-365.
 [6] ZHOU J G, CAUSON D M, MINGHAM C G, et al. The surface gradient method for the treatment of source terms in the shallow-water equations[J]. J of Comput Phys, 2001, 168: 1-25.
 [7] ROGERS B D, BORTHWICK A G L, TAYLOR P H. Mathematical balancing of flux gradient and source terms prior to using Roe's approximate riemann solver[J]. J Comput Phys, 2003, 192: 422-451.
 [8] KOMAEI S. An improved, robust implicit solution for the two-dimensional shallow water equations on unstructured grids [C]//BOUSMAR D, ZECH Y. Proc of 2nd Int Conf on Fluvial Hydraulics. Rotterdam [s.n.], 2004: 1065-1072.
 [9] ZHAO Di-hua, LAI J S, SHEN H W. A two-dimensional contaminant transport model with high resolution upwind schemes[C]//COTRONEO G V. Proc of ASCE 1994 Conf on Hydr Engrg Buffalo, New York: ASCE, 1994: 135-139.
 [10] 潘存鸿,徐昆.三角形网格下求解二维浅水方程的 KFVS 格式[J].水利学报,2006,37(7):858-864.
 [11] 王志力,耿艳芬,金生.具有复杂计算域和地形的二维浅水流动数值模拟[J].水利学报,2005,36(4):439-445.

(收稿日期:2008-07-28 编辑:骆超)

(上接第9页)-0.2 mm(绝对值,下同),且仅有2个残差超过1 mm,其余残差都小于1 mm。另外,残差的符号有正有负,表明残差具有随机性。该算例卡尔曼滤波法的拟合误差较小,采用卡尔曼滤波法预测2006年12月16日ZG88点水平位移变形值为648.9 mm,而ZG88点2006年12月16日水平位移变形监测值为650.6 mm,预测误差为1.7 mm,预测效果较好。

8 结 语

笔者讨论了树坪滑坡的基本特征及树坪滑坡的形成机制,介绍了树坪滑坡的监测系统及滑坡的变形特征。变形监测表明树坪滑坡的变形主要与滑坡体的地形地貌及土层结构有关,而大气降雨及三峡水库库水位的影响是导致树坪滑坡产生变形的外界因素,树坪滑坡上部变形小、下部变形大,表现为明显的牵引式滑坡变形特征。使用泰勒级数建立滑坡变形与时间的函数关系,并将泰勒级数的余项及时间变化的2次方及3次方的系数变化量看作数学期望为零的动态噪声,建立卡尔曼滤波模型,应用于树坪滑坡变形的预测预报。算例计算结果表明卡尔曼滤波模型的拟合效果和预测效果良好,可用于土质滑坡变形的短期预测预报。

参考文献:

[1] 张纘毅.基于灰色模型的滑坡变形预测[J].天津城市建设学院学报,2008,14(2):114-117.
 [2] 王祥,郑明新,张定邦.改进的灰色GM(1,1)模型在滑坡预测中的应用[J].华东交通大学学报,2008,25(4):11-14.
 [3] 尹晖,丁睿.时序预测和灰色预测用于链子崖危岩体定点变形预报的研究[J].中国地质灾害与防治学报,1996,7(增刊):49-55.
 [4] 陆付民,何薪基,任德记.AR(n)模型在滑坡变形分析中的应用[J].勘察科学技术,1996(6):53-54.
 [5] 王洪兴,唐辉明,陈聪.指数趋势模型在斜坡变形位移预测中的应用[J].岩土力学,2004,25(5):808-810.
 [6] 袁天鑫.最佳估计原理[M].北京:国防工业出版社,1979:45-67.
 [7] 崔希璋,於宗俦,陶本藻,等.广义测量平差[M].北京:测绘出版社,1992:123-156.
 [8] 贾沛璋.误差分析与数据处理[M].北京:国防工业出版社,1992:89-112.
 [9] 王正明,易东云.测量数据建模与参数估计[M].长沙:国防科技大学出版社,1997:84-98.
 [10] 陆付民.模型优化法在滑坡变形分析中的应用[J].勘察科学技术,2003,21(2):48-51.

(收稿日期:2008-09-05 编辑:骆超)